การพาความร้อนโดยบังคับแบบลามินาร์ในท่อขนานที่มีขนาดลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน

เรืออากาศโท สุทิน ยาวะโนภาส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2529

ISBN 974-567-004-9

012322

i 17961440

Laminar Forced Convection in Parallel Ducts with Abrupt Contraction and Expansion

Flying Office Sutin Yawanopas

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1986

ISBN 974-567-004-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพาความร้อนโดยบังคับแบบลามินาร์ในท่อขนานที่มีขนาดลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน
โดย	เรืออากาศโท สุทิน ยาวะโนภาส
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สหัส บัณฑิตกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง)

.....กรรมการ

(ดร.สหัส บัณฑิตกุล)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง การพาความร้อนโดยบังคับแบบลามินาร์ในท่อขนานที่มีขนาดลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน

ชื่อนิสิต เรืออากาศโท สุทิน ยาวะโนภาส

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สหัส บัณฑิตกุล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย การศึกษาค้นคว้าและทำการทดลองโดยออกแบบและสร้างเครื่องมือขึ้นเพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับการพาความร้อนโดยบังคับในท่อขนานที่มีขนาดลดลง และเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทดลอง การให้ความร้อนที่ผิวท่อคอคอดเป็นไปใน แบบอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นผิว การไหลที่ทางเข้าเป็นชนิดปรับตัวเต็มที่แล้วค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์สูงสุด 2000 โดยประมาณ อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของหน้าตัดคอคอดที่ใช้คือ 14:1 พื้นที่หน้าตัดท่อคอคอดต่อพื้นที่หน้าตัดท่อขนานก่อนถึงคอคอดที่ใช้มี 4 แบบ คือ 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 ค่าความยาวท่อคอคอดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิกมี 2 ขนาดคือ 10 และ 100 ผลที่ได้จากการทดลองคือค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ย, เกรตนัมเบอร์, พรานเดิ้ลนัมเบอร์, ตัวประกอบเสียดทานแฟนนิ่ง และ สัมประสิทธิ์การลดและเพิ่มของขนาดหน้าตัดฉาก ได้นำผลนี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ สมการดิฟเฟอเรนเชียลโดยคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่แล้วด้วย พร้อมกับได้สรุปความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของตัวประกอบไว้ในรูปของสูตรเอมไพริกัล เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะดังกล่าวต่อไป

Thesis Title	Laminar Forced Convection in Parallel Ducts with Abrupt Contraction and Expansion
Name	Flying Officer Sutin Yawanopas
Thesis Adviser	Associate Professor Kulthorn Silapabanleng, Ph.D
Thesis Co-Adviser	Sahas Banditkul, Ph.D
Department	Mechanical Engineering
Academic Year	1985

Abstract

Test equipment was designed and constructed to investigate laminar forced convection in parallel ducts with abrupt contraction and expansion for the thermal boundary condition of constant wall temperature which was maintained at room temperature, 50 °C and 60 °C respectively. Water was adopted as working fluid in rectangular duct with an aspect ratio of 14:1. The flow at the entrance section was fully developed laminar with the Reynolds number up to 2,000. Four constriction areas were experimented with the constrictions being 1/4, 1/2, 2/3 and 1 respectively of the duct cross-section area, for ducts with various L/D_h. The L/D_h ratios for long constriction and short constriction were 100 and 10 respectively. The experimental results of mean Nusselt number (Nu_m), Graetz number (Gz), Prandtl number (Pr), fanning friction factor (f), constriction coeficient (K_c), and expansion coefficient (K_e), for different Re's were calculated and formulated as empirical formulas. Comparison were also made with those obtained from other studies.

It is hoped that empirical formulas obtained would assist partly in the design of heat exchanging apparatus intended for use under above test conditions

กิตติกรรมประกาศ

ก่อนอื่นผู้เขียนขอกราบแทบเท้าระลึกถึงพระคุณของคุณพ่อคุณแม่ผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่าง และเป็นกำลังใจให้ลูกได้ฟันฝ่าอุปสรรคต่าง ๆ ผ่านไปด้วยดีตลอดมา ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธร ศิลปบรรเลง และ ดร.สหัส บัณฑิตกุล ที่กรุณาให้การสนับสนุน ให้ข้อคิด ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการดำเนินงาน - วิจัย เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงมาด้วยดีรวมทั้ง - ศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา วิบูลย์สวัสดิ์ ศาสตราจารย์ ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ขอระลึกถึงพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประศาสตร์ความรู้และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ นาวาอากาศเอก(พิเศษ) ประสิทธิ์ นิยมแก้ว ผอ.กศ.กพ.ทอ. ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนวทางในการศึกษาในชั้นนี้ นาวาอากาศเอก(พิเศษ)มงคล ชนะชัย ผอ.กรส.ชอ, นาวาอากาศเอกสมภพ ยินดีผล รอง ผอ.กรส.ชอ, และเจ้าหน้าที่ กรส.ชอ. ที่กรุณาเอื้อเฟื้อวัสดุ รวมทั้งได้สร้างอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดลอง รศ.ดร. วิทยา ยงเจริญ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับอุปกรณ์เครื่องวัดในการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณคุณพงษ์เจต พรหมวงศ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและปรึกษาในการทดลองครั้งนี้ และ คุณธงชัย สิงสังวรณ์ ได้กรุณาช่วยคิดตั้งอุปกรณ์ทดลองบางอย่าง และขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฌ

รายการตารางประกอบ ..... ญ

รายการรูปประกอบและกราฟ ..... ณ

รายการสัญลักษณ์ ..... ต

บทที่

1. บทนำ

1.1 การสำรวจงานวิจัยที่ทำมาแล้ว 1

1.2 จุดประสงค์ในการวิจัย 7

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 7

2. ทฤษฎี และการคำนวณจากผลการทดลอง

2.1 ทฤษฎี และการคำนวณจากผลการทดลอง 8

2.2 สรุปสมการใช้งาน 16

3. วิธีทำการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการทดลอง 17

3.2 อุปกรณ์ในการวัด 19

3.3 ขั้นตอนในการสร้าง การประกอบและการถอดเปลี่ยนส่วนทดสอบ 20

3.4 รูปอุปกรณ์การทดลองและอุปกรณ์ในการวัด 22

3.5 วิธีการทดลอง 31

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดลองและการอภิปราย 33

4.2 กราฟ 45

บทที่ หน้า

5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อสรุป 85

5.2 ข้อเสนอแนะ 90

เอกสารอ้างอิง 91

ภาคผนวก ก. 94

ภาคผนวก ข. 128

ภาคผนวก ค. 132

ประวัติการศึกษา 134

รายการตารางประกอบ

ก. ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อน

ตารางที่	ส่วนทดสอบ	หน้า
ก -1	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	95
ก -2	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	96
ก -3	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	97
ก -4	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	98
ก -5	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	99
ก -6	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	100
ก -7	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	101
ก -8	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	102
ก -9	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 100$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	103
ก -10	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 100$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	104
ก -11	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 100$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	105
ก -12	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 100$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	106
ก -13	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 100$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	107
ก -14	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 100$, $T_w = 60$ °C โดยประมาณ	108

ข. ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับความดันสูญเสียในท่อคอคอด

ตาราง	ส่วนทดสอบ	
ข -1	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 10$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง	109
ข -2	ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50$ °C โดยประมาณ	110

ข -3 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 111
ข -4 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 10$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 112
ข -5 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 113
ข -6 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 114
ข -7 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 10$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 115
ข -8 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 116
ข -9 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 117
ข -10 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1$, $L/D_h = 10$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 118
ข -11 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1$, $L/D_h = 10$, $T_w = 50\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 119
ข -12 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1$, $L/D_h = 10$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 120
ข -13 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 100$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 121
ข -14 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 100$, $T_w = 50\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 122
ข -15 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/4$, $L/D_h = 100$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 123
ข -16 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 100$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 124
ข -17 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 100$, $T_w = 50\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 125
ข -18 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 1/2$, $L/D_h = 100$, $T_w = 60\ ^{\circ}C$ โดยประมาณ 126
ข -19 ผลการทดลองของส่วนทดสอบที่มี $\sigma = 2/3$, $L/D_h = 100$, $T_w =$ อุณหภูมิห้อง 127

รายการรูปประกอบและกราฟ

รูปที่		หน้า
2.1	ท่อขนานที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน	12
2.2	การถ่ายเทความร้อน	14
3.1	ลักษณะทั่วไปของอุปกรณ์การทดลอง	22
3.2	การสร้างและการประกอบส่วนทดสอบ	23
3.3	ส่วนทดสอบ	24
3.3.1	ขนาดต่าง ๆ ของส่วนทดสอบ	25
3.4	ถังพักน้ำระดับสูง	26
3.5	ท่อขนานโค้ง	26
3.6	ท่อขนานก่อนน้ำเข้าและออกจากส่วนทดสอบ	27
3.7	ท่อขนานลดขนาด	28
3.8	ถังต้มน้ำร้อน	28
3.9	เทอร์โมคับเปิ้ล	29
3.10	มัลติมาโนมิเตอร์	29
3.11	ไมโครมาโนมิเตอร์	29
3.12	ตาชั่ง, ถังชั่งน้ำ และถังรองรับน้ำ	29
3.13	การวัดอุณหภูมิน้ำเย็นก่อนเข้าส่วนทดสอบ	30
3.14	การวัดอุณหภูมิน้ำเย็นหลังออกจากส่วนทดสอบ	30
3.15	การวัดอุณหภูมิที่ผิวท่อคอคอดที่ปากทางเข้าและออก	30
5.1	การแจกแจงอุณหภูมิในกรณีอุณหภูมิคงที่ตลอดพื้นผิวท่อคอคอด $\sigma = 0.5$, $L/D_h = 10$, $Re = 2000$, $Pr = 0.72$, 2.0, 5.0 และ 10.0	87
5.2	กระแสของไหลในท่อขนานที่มีขนาดลดลงอย่างฉับพลัน	88
5.3	กระแสของไหลในท่อขนานที่มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน	88
5.4	ภาพถ่ายกระแสของไหลหลังจากผ่านหน้าตัดฉากที่ค่า Re ต่างกัน	89

กราฟ		หน้า
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re เมื่อ σ = 1/4, และ 2/3 L/D_h = 100 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	46
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re เมื่อ σ = 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 L/D_h = 100 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	47
4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Gz เมื่อ σ = 1/4, 1/2 และ 2/3 L/D_h = 100 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	48
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Gz เมื่อ σ = 1/4, 1/2 และ 2/3 L/D_h = 100 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	49
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ $Gz^{1/3}$ เมื่อ σ = 1/4, 1/2 และ 2/3 L/D_h = 100 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 และ 60 °C โดยประมาณ	50
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re เมื่อ σ = 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 L/D_h = 10 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	51
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Re เมื่อ σ = 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 L/D_h = 10 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	52
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Gz เมื่อ σ = 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 L/D_h = 10 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	53

กราฟ		หน้า
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ Gz เมื่อ σ = 1, 2/3, 1/2 และ 1/4 อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	54
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_m กับ B_H ($B_H = Gz.\sigma^{1/3}$) เมื่อ σ = 1/4, 1/2 , 2/3 และ 1, L/D_h = 10 จากข้อมูลการทดลอง เมื่อ $B_H > 4.4$ อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 และ 60 °C โดยประมาณ	55
4.11	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/4, L/D_h = 100, Re = 1486, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 °C (อุณหภูมิห้อง)	56
4.12	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/4, L/D_h = 100, Re = 1400, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	57
4.13	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/4, L/D_h = 100, Re = 1508, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	58
4.14	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 100, Re = 1484, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 °C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ	59
4.15	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 100, Re = 1539, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	60
4.16	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ตลอดความยาวท่อคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 100, Re = 1524, อุณหภูมิท่อคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	61

กราฟ หน้า

4.17 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 2/3, L/D_h = 100, Re = 1489, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 ^{o}C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ 62

4.18 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1 L/D_h = 10, Re = 1460, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 ^{o}C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ 63

4.19 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1 L/D_h = 10, Re = 1532, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 ^{o}C โดยประมาณ 64

4.20 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1 L/D_h = 10, Re = 1538, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 ^{o}C โดยประมาณ 65

4.21 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 2/3, L/D_h = 10, Re = 1432, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 ^{o}C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ 66

4.22 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 2/3, L/D_h = 10, Re = 1390, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 ^{o}C โดยประมาณ 67

4.23 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 2/3, L/D_h = 10, Re = 1409, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 ^{o}C โดยประมาณ 68

4.24 การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 10, Re = 1429, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 ^{o}C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ 69

กราฟ		หน้า
4.25	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 10, Re = 1487, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	70
4.26	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 10, Re = 1502, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	71
4.27	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/4, L/D_h = 10, Re = 1393, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 26.2 °C (อุณหภูมิห้อง) โดยประมาณ	72
4.28	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/2, L/D_h = 10, Re = 1525, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	73
4.29	การแจกแจงความดัน ณ จุดใด ๆ ต่อความยาวท่อคอคอด เมื่อ σ = 1/4, L/D_h = 10, Re = 1416, อุณหภูมิท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	74
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน K_c และ K_e กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด σ [3]	75
4.30ก	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน K_c และ K_e กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด σ [21]	76
4.30ข	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน K_c และ K_e กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด σ ที่อุณหภูมิห้อง	77
4.30ค	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน K_c และ K_e กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด σ ที่อุณหภูมิผิวท่อคอคอดเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 50 °C โดยประมาณ	78

กราฟ		หน้า
4.30ง	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน K_c และ K_e กับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด σ ที่อุณหภูมิผิวท่อคอคอดเท่ากันตลอดพื้นผิวคือ T_w = 60 °C โดยประมาณ	79
4.31	Correction factors สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน C_c, C_e และ C_f สำหรับการไหลผ่านท่อคอคอดกับ B_F [3]	80
4.32	Correction factors สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน C_c, C_e และ C_f สำหรับการไหลผ่านท่อคอคอดกับ B_F เมื่อ R_e < 1600 [21]	81
4.33	Correction factors สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน C_c, C_e และ C_f สำหรับการไหลผ่านท่อคอคอดกับ B_F ที่อุณหภูมิผิวท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิว T_w = 26.2 °C (อุณหภูมิห้อง)	82
4.33ก	Correction factors สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน C_c, C_e และ C_f สำหรับการไหลผ่านท่อคอคอดกับ B_F ที่อุณหภูมิผิวท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิว T_w = 50 °C โดยประมาณ	83
4.33ข	Correction factors สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความดัน C_c, C_e และ C_f สำหรับการไหลผ่านท่อคอคอดกับ B_F ที่อุณหภูมิผิวท่อคอคอดเป็นแบบเท่ากันตลอดพื้นผิว T_w = 60 °C โดยประมาณ	84

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญญลักษณ์

สัญญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดของท่อขนาน	(เมตร)^2
a	ความกว้างของท่อขนาน	เมตร
b	ความกว้างของท่อคอคอด	เมตร
B_F	$(ReD_h/L)^{1/3}\ \sigma^{1/4}$	-
B_H	$Gz\ \sigma^{1/3}\ \sigma^{1/4}$ หรือ $B_F.Pr^{1/3}$	-
C	Correction factor, $(b/L)^2$	-
C_c	Correction factor สำหรับ K_c	-
C_e	Correction factor สำหรับ K_e	-
C_f	Correction factor สำหรับ K_f	-
D	เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ	เมตร
D_h	เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก, 4A/P	เมตร
e	ความขรุขระของผิวท่อ	เมตร
f	ตัวประกอบความเสียดทานแฟนนิ่ง,	-
g_c	Conversion factor	(เมตร)^2 /วินาที^{2}
h_m	ค่าเฉลี่ยแบบล็อกของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	-
K_c	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของท่อขนานที่ลดขนาดลงอย่างฉับพลัน	-
K_e	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของท่อขนานที่เพิ่มขนาดขึ้นอย่างฉับพลัน	-
K_c^*	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของท่อขนานที่ลดขนาดลงอย่างฉับพลันสำหรับท่อคอคอดแบบสั้น	-
k_e^*	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของท่อขนานที่เพิ่มขนาดขึ้นอย่างฉับพลันสำหรับท่อคอคอดแบบสั้น	-

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
L	ความยาวท่อคอคอด	เมตร
q	ความยาวเส้นรอบท่อ	เมตร
P^*	ความดันสถิต	นิวตัน/(เมตร)^2
P	$P^* g_c b^{*2} / \rho \nu^{*2}$	-
ΔP^*	ความดันลด	นิวตัน/(เมตร)^2
ΔP	$\Delta P^* g_c b^{*2} / \rho \nu^{*2}$	
Gz	เกรตนัมเบอร์, Re.Pr/(L/Dh)	-
Nu	นัสเซลท์นัมเบอร์, hD_h/K	-
Pr	พรานเดิ้ลนัมเบอร์, $\mu C_p/\rho$	-
Re	เรย์โนลด์นัมเบอร์, $\rho VD_h/\mu$	-
T	$t^*-t_w^*/t^*-t_a^*$	-
t	อุณหภูมิ	$^\circ$C
u	องค์ประกอบความเร็วของของไหลในทิศทาง x, $U^* b^{*2}/\nu L^* = \partial\psi/\partial y$	-
v	องค์ประกอบความเร็วของของไหลในทิศทาง y, $V^* b^*/\nu = \partial\psi/\partial x$	-

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญาลักษณ์อักษรกรีก

สัญญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล	นิวตัน-วินาที/(เมตร)^2
ν	ความหนืดจลน์ของของไหล	(เมตร)^2/วินาที
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	กิโลกรัม/(เมตร)^2
φ	ฟังก์ชั่น	
σ	อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดท่อคอดต่อพื้นที่หน้าตัดท่อขนาน	-
ψ	Stream function	-

ตัวห้อยท้าย

a	ของไหลที่ปากทางเข้าและทุก ๆ จุดภายในท่อคอดคอด
c	ของท่อขนานลดขนาดลงอย่างฉับพลัน
e	ของท่อขนานเพิ่มขนาดขึ้นอย่างฉับพลัน
f	ค่าสุดท้าย
m	ค่าเฉลี่ยแบบล็อก
o	ค่าเริ่มต้น
w	พื้นผิวท่อคอดคอด

หมายเหตุ * ปริมาณมิติ หรือ ท่อคอดคอดแบบสั้น